



УДК 544.23.022

## ВЛИЯНИЕ НАНОКРИСТАЛЛОВ ФЕРРИТОВ НА СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ КАЛИЕВО-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКЛОЛ

А.Н. Бабкина<sup>а</sup>, Д.И. Соболев<sup>а</sup>, Н.В. Никоноров<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
Адрес для переписки: ezkimos@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 13.05.17, принята к печати 09.06.17  
doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-635-639

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Бабкина А.Н., Соболев Д.И., Никоноров Н.В. Влияние нанокристаллов ферритов на спектры комбинационного рассеяния калиево-алюмоборатных стекол // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 4. С. 635–639. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-635-639

### Аннотация

**Предмет исследования.** Представлены результаты исследований калиево-алюмоборатных стекол с нанокристаллами ферритов. Исследован процесс формирования нанокристаллов ферритов в калиево-алюмоборатной стеклообразной матрице. Исследованы спектры комбинационного рассеяния исследуемых стекол. **Метод.** Исследуемые стекла синтезированы методом плавки шихты в тигле. Использована калиево-алюмоборатная стеклообразная система ( $K_2O-Al_2O_3-B_2O_3$ ) и активирующие добавки:  $Fe_2O_3$  3 вес.% (состав №1),  $Fe_2O_3$  3 вес.% и  $MnO$  2 вес.% (состав №2). Температура синтеза составила 1300 °С. Выделение нанокристаллической фазы ферритов происходило в процессе изотермической обработки при температуре 560 °С в течении 3 часов. Спектры комбинационного рассеяния возбуждались поляризованным излучением гелий-неонового лазера ( $\lambda=633$  нм) мощностью 50 Вт и регистрировались однопроходным спектрометром *Renishaw*. Возбуждающее излучение фокусировалось на образец с помощью оптического микроскопа *Leica*. **Основные результаты.** Показано, после проведения изотермической обработки стекол при температуре 560 °С в течение 3 часов в стеклах происходит формирование нанокристаллов магнетита и феррита марганца. На спектрах комбинационного рассеяния это проявляется в возникновении дополнительных полос в области  $350$ ,  $680$   $cm^{-1}$  и  $630$   $cm^{-1}$ , которые соответствуют модам  $E_g$ ,  $A_{1g}$   $FeFe_2O_4$  и  $A_{1g}$   $MnFe_2O_4$ . **Практическая значимость.** Предложенные и исследованные в работе стекла, активированные нанокристаллами, могут служить основой для оптических изоляторов на основе эффекта Фарадея и в качестве чувствительных сред для датчиков тока.

### Ключевые слова

комбинационное рассеяние, калиево-алюмоборатное стекло, магнетит, феррит марганца, нанокристалл

## EFFECT OF FERRITE NANOCRYSTALS ON RAMAN SPECTRA OF POTASSIUM-ALUMINBORATE GLASS

A.N. Babkina<sup>а</sup>, D.I. Sobolev<sup>а</sup>, N.V. Nikonorov<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
Corresponding author: ezkimos@gmail.com

### Article info

Received 13.05.17, accepted 09.06.17  
doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-635-639  
Article in Russian

**For citation:** Babkin A.N., Sobolev D.I., Nikonorov N.V. Effect of ferrite nanocrystals on raman spectra of potassium-aluminaborate glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 635–639 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-4-635-639

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents research results of potassium-aluminaborate glass with ferrite nanocrystals. The formation process of the ferrite nanocrystals in potassium-aluminaborate glass host is studied. The spectral characteristics of Raman scattering are analyzed. **Method.** The glasses under study are synthesized by the method of batch melting in the crucible. Potassium-aluminaborate glass system ( $K_2O-Al_2O_3-B_2O_3$ ) and such dopants as 3 wt%  $Fe_2O_3$  (composition 1), 3 wt%  $Fe_2O_3$  and 2 wt%  $MnO$  (composition 2) are used. The glass synthesis temperature is 1300 °С. The ferrite crystal phase nucleation occurred during heat treatment at 560 °С for 3 hours. The Raman spectra are excited by radiation of a polarized helium-neon laser ( $\lambda=633$  nm) with 50 Wt power and are recorded by a single pass *Renishaw* spectrometer. Stimulating

pulses are focused onto the sample by *Leica* optical microscope. **Main Results.** It is shown that after glass isothermal treatment at the temperature equal to 560 °C for 3 hours the formation of nanocrystals of magnetite and manganese ferrite occurs. It is connected with the appearance in the Raman spectra of additional bands near 350, 680  $\text{cm}^{-1}$  and 630  $\text{cm}^{-1}$ , which corresponds to the modes  $E_g$ ,  $A_{1g}$  of  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  and  $A_{1g}$  of  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ . **Practical Relevance.** The activated glasses under research could be applied as the sensitive media for the design of the optical isolators based on the Faraday effect and current sensors.

#### Keywords

Raman scattering, potassium-aluminoborate glass, magnetite, manganese ferrite, nanocrystal

#### Введение

Возрастающий интерес к магнитным наносистемам обусловлен перспективностью использования магнитных наноматериалов в современных высокотехнологичных устройствах в области оптико-электронного приборостроения, таких как датчики тока [1–3] и оптические изоляторы [4, 5], и в биомедицинских технологиях – магнитный транспорт лекарственных препаратов [6] и контрастирование для проведения исследований методом магнитно-резонансной томографии [7]. Наиболее распространенными материалами, обладающими высокими магнитооптическими характеристиками, являются монокристаллы ферритов [8, 9].

Во многих работах показано, что структурные методы анализа с использованием рентгеновских лучей малоэффективны при работе с кристаллами ферритов в силу того, что большинство из них обладает схожей кубической структурой шпинели с гранцентрированной кубической элементарной ячейкой пространственной группы  $Fd\bar{3}m$ . Спектры комбинационного рассеяния являются более чувствительными к определению типа структуры кристаллической окиси железа. Кристаллы феррита марганца обладают 18 колебательными модами, 5 из которых являются активными, а именно, моды  $A_{1g}$ ,  $E_g$  и  $3T_{2g}$  [10]. Эти пять активных полос связаны в основном с движением ионов  $\text{O}^{2-}$  и (или) ионов  $\text{O}^{2-}$  и ионов металлов. Мода  $A_{1g}$  относится к симметричным растяжениям тетраэдров  $\text{FeO}_4$ , и в большинстве работ она располагается в области 620–700  $\text{cm}^{-1}$ . Результаты положения полосы разнятся от работы к работе из-за множества схем катионного упорядочения между октаэдрическими и тетраэдрическими позициями, перемешивание между которыми приводит к потере симметрии и к переходу к более низкосимметричной пространственной группе [11]. Наиболее частое расположение моды  $A_{1g}$  приходится на 670  $\text{cm}^{-1}$  [12]. Положение колебательной моды также зависит от наличия вакансий в позициях ( $A$  или  $B$ ), за которые данная мода отвечает: с увеличением количества вакансий частота моды увеличивается. В магнетите, в котором 8/3 атомов Fe замещены вакансиями, мода  $A_{1g}$  лежит в области 700  $\text{cm}^{-1}$  [13]. Мода  $E_g$  относится к симметричным отклонениям ионов  $\text{O}^{2-}$  относительно ионов Fe, ее частоты лежат в области 250–360  $\text{cm}^{-1}$  [11, 14]. Появление трех мод  $T_{2g}$  связано с несимметричными отклонениями и колебаниями ионов лигандов (в данном случае ионов кислорода), их частотные области лежат в широком диапазоне [11].

В работах [15, 16] были получены ферромагнитные магнитооптические стекла на основе калиево-алюмооборатной стеклообразной матрицы, активированные кристаллами гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и феррита марганца  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ . Показано, что такой материал обладает свойствами, характерными для магнитоупорядоченного состояния, и при этом существует возможность путем вариации набора добавок сохранить его прозрачность в ближней инфракрасной области спектра.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является исследование влияния нанокристаллов ферритов на спектры комбинационного рассеяния калиево-алюмооборатных стекол.

#### Объекты и методы исследования

Данная работа является продолжением исследований, проведенных авторами ранее, состав калиево-алюмооборатного стекла, выбранного в качестве объекта исследования, представлен в работах [16, 17]. Синтез стекол проводился в корундовых тиглях при температуре 1300 °C с перемешиванием расплава в воздушной атмосфере платиново-родиевой мешалкой в течение 90 мин. В настоящей работе были исследованы два состава стекла, отличающиеся содержанием активных добавок: в состав №1 было введено 3 вес.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , в состав №2 – 3 вес.%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и 2 вес.% MnO. Для последующей нуклеации нанокристаллов оксида железа и феррита марганца полученное после синтеза стекло прошло изотермическую обработку при температуре 560 °C в течение 3 часов. Размеры выделенных нанокристаллов и оптические параметры полученных стекол приведены в работе [16].

Спектры комбинационного рассеяния света возбуждались поляризованным излучением гелий-неонового лазера ( $\lambda=633$  нм) мощностью 50 Вт и регистрировались однопроходным спектрометром *Renishaw*. Возбуждающее излучение фокусировалось на образец с помощью оптического микроскопа *Leica*.

Используемая в работе экспериментальная установка по регистрации спектров комбинационного рассеяния может быть использована только для исследования структурных изменений в приповерхностном слое материала. Исходя из этого, спектры образцов с небольшим содержанием активных добавок мало отличаются от спектров исходного стекла. В этой связи для исследования структурных изменений в работе были взяты стекла с концентрацией добавок не менее 3 вес.%. Образцы для проведения исследо-

ваний были вырезаны из середины полученной после синтеза заготовки стекла. В силу того, что в процессе синтеза расплав был гомогенизирован мешалкой, можно говорить о том, что изменения, регистрируемые спектроскопией комбинационного рассеяния в приповерхностных слоях образцов, совпадают с таковыми во всем объеме стекла.

### Результаты и обсуждение

На рисунке (кривая 1) представлен спектр комбинационного рассеяния калиево-алюмоборатного стекла без добавок. В спектре доминирует дублетная полоса с максимумами в области  $770$  и  $800\text{ см}^{-1}$ , которые соответствуют колебаниям основных структурных групп боратного стекла – бороксольных колец с одним тетраэдром  $[\text{BO}_4]$  (или одним немостиковым кислородом) и чистых бороксольных групп  $\text{B}_3\text{O}_6$  соответственно. В работе [18] показано, что такая дублетная структура появляется при содержании окиси калия в стекле менее 20 вес.%, как в случае нашего стекла. Широкая полоса в области  $400\text{--}500\text{ см}^{-1}$  относится к изолированным диборатным группам и колебаниям К-О. Высокочастотные полосы связаны с диборатными группами и треугольниками  $[\text{BO}_2\text{O}^-]$ , присоединенными к тетраэдрам  $[\text{BO}_4]$  и другим треугольникам.

Введение в стекло окиси железа приводит к появлению выраженной полосы на  $680\text{ см}^{-1}$  (кривая 2), в работе [12] показано, что мода  $A_{1g}$  магнетита располагается именно в этой области. При этом интенсивность собственных колебаний матрицы стекла уменьшается вплоть до нуля, что говорит о разрыве бороксольных колец и уменьшении концентрации диборатных групп при встраивании в структуру стекла ионов железа. После проведения изотермической обработки стекла состава №1 в матрице происходит выделение нанокристаллов  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [15]. После термообработки на спектре появляется низкочастотная полоса (около  $300\text{ см}^{-1}$ ) (кривая 3), которая совпадает по расположению с колебаниями моды  $E_g$  магнетита. При этом возвращаются полосы, ответственные за структурные группы матрицы стекла. Вероятно, в процессе изотермической обработки произошла релаксация дефектов, вызванных встраиванием ионов железа, таким образом, кольцевая структура стекла частично восстановила свою первоначальную структуру. При исследовании такого стекла рентгеновскими структурными методами можно определить лишь химический состав нанокристаллической фазы. Однако в случае полученных в настоящей работе результатов можно утверждать, что из всех известных модификаций окиси железа в данном случае в стекле выделяется именно магнетит.

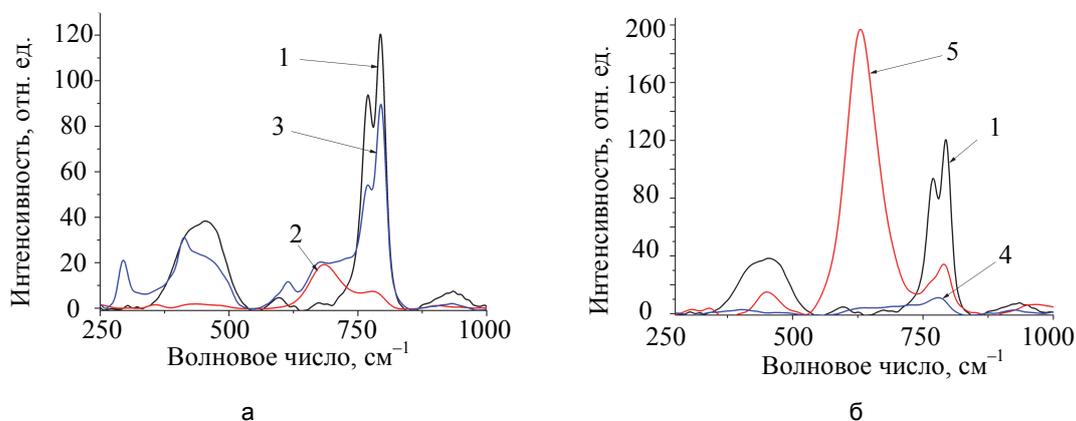


Рисунок. Спектры комбинационного рассеяния калиево-алюмоборатного стекла: 1 – без добавок, 2 – состава №1, 3 – состава №1 после термообработки (а); 1 – без добавок, 4 – состава №2, 5 – состава №2 после термообработки (б)

В работе [19] легирование керамики на основе феррита диспрозия марганцем приводит к уширению и уменьшению интенсивности полос комбинационного рассеяния материала. В настоящей работе при добавлении ионов марганца полосы колебаний структурных единиц стекла также уменьшаются (рисунок, кривая 4), что связано с разупорядочиванием стеклообразующих кристаллитов. Последующая изотермическая обработка приводит к появлению интенсивной полосы с максимумом около  $630\text{ см}^{-1}$  (кривая 5). Результаты исследования, приведенные в работе [16], демонстрируют образование в калиево-алюмоборатном стекле при аналогичных условиях термообработки нанокристаллов феррита марганца со средним размером порядка 18 нм.

Во множестве работ [10, 20], посвященных исследованиям макрокристаллов феррита марганца, показано, что частота наиболее интенсивной моды ( $A_{1g}$ ) соответствует  $625\text{ см}^{-1}$ . Таким образом, посредством спектроскопии комбинационного рассеяния было определено, что в стеклах калиево-алюмоборатной матрицы состава №2 после проведения термообработки происходит выделение нанокристаллов феррита марганца.

## Заключение

В результате проведенного исследования выявлено, что выделение в калиево-алюмооборатном стекле нанокристаллов магнетита и феррита марганца значительно влияет на спектры комбинационного рассеяния стекол. Исходя из этого, спектроскопию комбинационного рассеяния можно использовать наравне со структурными рентгеновскими методами для определения наличия кристаллической железосодержащей фазы в неорганических стеклах. Исследуемые калиево-алюмооборатные стекла, активированные ионами железа и марганца, являются перспективным материалом для создания датчиков тока и изоляторов лазерного излучения на основе эффекта Фарадея.

## Литература

## References

- Shen Y. et al. Effect of temperature on characteristics of rare earth-doped magneto-optical glass in optical current transducer application // *Optik*. 2015. V. 126. N 23. P. 3589–3593. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.08.249
- Chen Q., Ma Q., Wang H., Chen Q. Structural and properties of heavy metal oxide Faraday glass for optical current transducer // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2015. V. 429. P. 13–19. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.08.031
- Chen Q. et al. Structural, optical and magnetic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sputtered TeO<sub>2</sub>-PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and PbO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses for sensing applications // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2015. V. 408. P. 43–50. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.10.011
- Starobor A.V., Zheleznov D.S., Palashov O.V., Savinkov V.I., Sigaev V.N. Borogermanate glasses for Faraday isolators at high average power // *Optics Communication*. 2016. V. 358. P. 176–179. doi: 10.1016/j.optcom.2015.09.047
- Chen Z., Yang L., Wang X., Wang J., Hang Y. Fabrication and characterizations of an erbium doped terbium gallium garnet crystal for faraday rotators // *Materials Letters*. 2015. V. 161. P. 93–95. doi: 10.1016/j.matlet.2015.08.085
- Jinhao G.A.O., Hongwei G.U., Bing X.U. Multifunctional magnetic nanoparticles: design, synthesis, and biomedical applications // *Accounts of Chemical Research*. 2009. V. 42. N 8. P. 1097–1107. doi: 10.1021/ar9000026
- Allkemper T., Bremer C., Matuszewski L., Ebert W., Reimer P. Contrast-enhanced blood-pool MR angiography with optimized iron oxides: effect of size and dose on vascular contrast enhancement in rabbits // *Radiology*. 2002. V. 223. N 2. P. 432–438.
- Rathenau G.W., Smit J., Stuyts A.L. Ferromagnetic properties of hexagonal iron-oxide compounds with and without a preferred orientation // *Zeitschrift fur Physik*. 1952. V. 133. N 1–2. P. 250–260. doi: 10.1007/BF01948700
- Went J.J., Rathenau G.W., Gorter E.W., Van Oosterhout G.W. Hexagonal iron-oxide compounds as permanent-magnet materials // *Physical Review*. 1952. V. 86. N 3. P. 424–425. doi: 10.1103/PhysRev.86.424.2
- Thota S., Kashyap S.C., Sharma S.K., Reddy V.R. Micro Raman, Mossbauer and magnetic studies of manganese substituted zinc ferrite nanoparticles: role of Mn // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2016. V. 91. P. 136–144. doi: 10.1016/j.jpcs.2015.12.013
- Sena N.C., Castro T.J., Garg V.K. et al. Gadolinium ferrite nanoparticles: synthesis and morphological, structural and magnetic properties // *Ceramics International*. 2016. V. 43. N 5. P. 4042–4047. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.155
- Sousa M.H., Tourinho F., Rubim J.C. Use of Raman micro-spectroscopy in the characterization of M(II) Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Fe, Zn) electric double layer ferrofluids // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2000. V. 31. N 3. P. 185–191.
- de Faria D.L.A., Venâncio Silva S., de Oliveira M.T. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides // *Journal of Raman Spectroscopy*. 1997. V. 28. N 11. P. 873–878.
- Wang Z., Lazor P., Saxena S.K., O'Neill H.St.C. High pressure Raman spectroscopy of ferrite MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> // *Materials Research Bulletin*. 2002. V. 37. N 9. P. 1589–1602. doi: 10.1016/S0025-5408(02)00819-X
- Edelman I.S., Zarubina T.V., Stepanov S.A., Kim T.A. Magnetic properties of ferrite microparticles in borate glasses // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1992. V. 110. P. 99–102. doi: 10.1016/0304-8853(92)90017-I
- Соболев Д.И., Никоиоров Н.В., Ширшнев П.С., Нурьев
- Shen Y. et al. Effect of temperature on characteristics of rare earth-doped magneto-optical glass in optical current transducer application. *Optik*, 2015, vol. 126, no. 23, pp. 3589–3593. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.08.249
- Chen Q., Ma Q., Wang H., Chen Q. Structural and properties of heavy metal oxide Faraday glass for optical current transducer. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, vol. 429, pp. 13–19. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.08.031
- Chen Q. et al. Structural, optical and magnetic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> sputtered TeO<sub>2</sub>-PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and PbO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses for sensing applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, vol. 408, pp. 43–50. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2014.10.011
- Starobor A.V., Zheleznov D.S., Palashov O.V., Savinkov V.I., Sigaev V.N. Borogermanate glasses for Faraday isolators at high average power. *Optics Communication*, 2016, vol. 358, pp. 176–179. doi: 10.1016/j.optcom.2015.09.047
- Chen Z., Yang L., Wang X., Wang J., Hang Y. Fabrication and characterizations of an erbium doped terbium gallium garnet crystal for faraday rotators. *Materials Letters*, 2015, vol. 161, pp. 93–95. doi: 10.1016/j.matlet.2015.08.085
- Jinhao G.A.O., Hongwei G.U., Bing X.U. Multifunctional magnetic nanoparticles: design, synthesis, and biomedical applications. *Accounts of Chemical Research*, 2009, vol. 42, no. 8, pp. 1097–1107. doi: 10.1021/ar9000026
- Allkemper T., Bremer C., Matuszewski L., Ebert W., Reimer P. Contrast-enhanced blood-pool MR angiography with optimized iron oxides: effect of size and dose on vascular contrast enhancement in rabbits. *Radiology*, 2002, vol. 223, no. 2, pp. 432–438.
- Rathenau G.W., Smit J., Stuyts A.L. Ferromagnetic properties of hexagonal iron-oxide compounds with and without a preferred orientation. *Zeitschrift fur Physik*, 1952, vol. 133, no. 1–2, pp. 250–260. doi: 10.1007/BF01948700
- Went J.J., Rathenau G.W., Gorter E.W., Van Oosterhout G.W. Hexagonal iron-oxide compounds as permanent-magnet materials. *Physical Review*, 1952, vol. 86, no. 3, pp. 424–425. doi: 10.1103/PhysRev.86.424.2
- Thota S., Kashyap S.C., Sharma S.K., Reddy V.R. Micro Raman, Mossbauer and magnetic studies of manganese substituted zinc ferrite nanoparticles: role of Mn. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2016, vol. 91, pp. 136–144. doi: 10.1016/j.jpcs.2015.12.013
- Sena N.C., Castro T.J., Garg V.K. et al. Gadolinium ferrite nanoparticles: synthesis and morphological, structural and magnetic properties. *Ceramics International*, 2016, vol. 43, no. 5, pp. 4042–4047. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.11.155
- Sousa M.H., Tourinho F., Rubim J.C. Use of Raman micro-spectroscopy in the characterization of M(II) Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M = Fe, Zn) electric double layer ferrofluids. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2000, vol. 31, no. 3, pp. 185–191.
- de Faria D.L.A., Venâncio Silva S., de Oliveira M.T. Raman microspectroscopy of some iron oxides and oxyhydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, 1997, vol. 28, no. 11, pp. 873–878.
- Wang Z., Lazor P., Saxena S.K., O'Neill H.St.C. High pressure Raman spectroscopy of ferrite MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Materials Research Bulletin*, 2002, vol. 37, no. 9, pp. 1589–1602. doi: 10.1016/S0025-5408(02)00819-X
- Edelman I.S., Zarubina T.V., Stepanov S.A., Kim T.A. Magnetic properties of ferrite microparticles in borate glasses. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1992, vol.

- Р.К., Степанов С.А., Панов Д.Ю. Синтез, структура и спектральные свойства калиево-алюмоборатных стекол с нанокристаллами феррита марганца // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 642–648. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-642-648
17. Бабкина А.Н., Никоноров Н.В., Цехомский В.А., Ширшнев П.С. Влияние температуры на экситонное поглощение нанокристаллов хлорида и бромида меди в калиевоалюмоборатном стекле // ФХС. 2015. Т. 41. № 1. С. 113–120.
  18. Konijnendijk W.L., Stevels J.M. The structure of borate glasses studied by Raman scattering // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1975. V. 18. N 3. P. 307–331. doi: 10.1016/0022-3093(75)90137-4
  19. Reddy S.S.K., Raju N., Reddy C.G. et al. Study of Mn doped multiferroic DyFeO<sub>3</sub> ceramics // *Ceramics International*. 2017. V. 43. N 8. P. 6148–6155. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.02.010
  20. Graves P.R., Johnston C., Campaniello J.J. Raman scattering in spinel structure ferrites // *Materials Research Bulletin*. 1988. V. 23. N 11. P. 1651–1660. doi: 10.1016/0025-5408(88)90255-3
  - 110, pp. 99–102. doi: 10.1016/0304-8853(92)90017-I
  16. Sobolev D.I., Nikonorov N.V., Shirshnev P.S., Nuryev R.K., Stepanov S.A., Panov D.Yu. Synthesis, structure and spectral properties of potassium-alumina-borate glass with nanocrystals of manganese ferrite. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 642–648. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-642-648
  17. Babkina A.N., Nikonorov N.V., Tsekhomskii V.A., Shirshnev P.S. The effect of temperature on the exciton absorption of copper chloride and copper bromide nanocrystals in potassium-aluminum-borate glass. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, no. 1, pp. 81–88. doi: 10.1134/S1087659615010046
  18. Konijnendijk W.L., Stevels J.M. The structure of borate glasses studied by Raman scattering. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1975, vol. 18, no. 3, pp. 307–331. doi: 10.1016/0022-3093(75)90137-4
  19. Reddy S.S.K., Raju N., Reddy C.G. et al. Study of Mn doped multiferroic DyFeO<sub>3</sub> ceramics. *Ceramics International*, 2017, vol. 43, no. 8, pp. 6148–6155. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.02.010
  20. Graves P.R., Johnston C., Campaniello J.J. Raman scattering in spinel structure ferrites. *Materials Research Bulletin*, 1988, vol. 23, no. 11, pp. 1651–1660. doi: 10.1016/0025-5408(88)90255-3

### Авторы

**Бабкина Анастасия Николаевна** – кандидат физико-математических наук, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, babkina.anastasya@bk.ru

**Соболев Дмитрий Игоревич** – аспирант, инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ezkimos@gmail.com

**Никоноров Николай Валентинович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, nikonorov@oi.ifmo.ru

### Authors

**Anastasiya N. Babkina** – PhD, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, babkina.anastasya@bk.ru

**Dmitrii I. Sobolev** – postgraduate, engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ezkimos@gmail.com

**Nikolai V. Nikonorov** – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, nikonorov@oi.ifmo.ru